



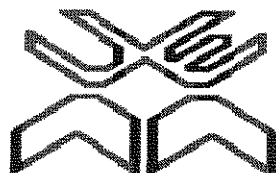
UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

EXAME DE ESTADO

**Análise da tecnologia de armazenamento de
energia em sistemas fotovoltaicos isolados**

Ramadane Leonel Afido Ramadane

Maputo, Junho de 2012



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

EXAME DE ESTADO

**Análise da tecnologia de armazenamento de energia
em sistemas fotovoltaicos isolados**

Trabalho apresentado ao curso de licenciatura em Física Aplicada, área de energias renováveis, da Universidade Eduardo Mondlane (UEM), como requisito parcial para a
obtenção do grau de:

LICENCIADO EM FÍSICA APLICADA

Maputo, Junho de 2012

Agradecimentos

Aos meus pais, a quem dedico este trabalho, pela paciência, pelo suporte económico, pela ajuda, pelo animo, enfim... por tudo que já fizeram por mim e pelo que farão ao longo da minha vida.

Aos meus irmãos Néelson Víctor, Mara Alexandra, Íris de Sérgio e Teresa (em memória) pelo apoio nos momentos difíceis.

Aos meus colegas de curso e a todos os docentes do departamento de Física.

Aos meus amigos Hermenegildo Timane, Francisco Mota, Miguel de Jesus, entre outros, pelo incondicional e infinito apoio.

À todos: MUITO OBRIGADO!

Declaração

Declaro que este trabalho é de minha autoria e resulta da minha investigação. Esta é a primeira vez que o submeto para obter um grau académico numa instituição educacional.

Maputo, aos 27 de Junho..... de 2012

Ramadane L. A. Ramadane

Ramadane L. A. Ramadane

RESUMO

Diversos países, com uma quantidade significativa da população vivendo em zonas rurais, sem acesso a energia eléctrica e a serviços sociais básicos, encontram na tecnologia fotovoltaica um caminho para o seu desenvolvimento humano e produtivo.

Para garantir a sustentabilidade dos projectos de sistemas fotovoltaicos isolados faz-se necessária uma participação activa do usuário na compreensão, capacitação e nas práticas de manutenções da tecnologia.

Considerando-se a necessidade de otimizar e prolongar a vida útil dos acumuladores de energia em sistemas fotovoltaicos isolados, no presente trabalho apresenta-se a análise e descrição das tecnologias de armazenamento de energia, dando maior ênfase às baterias chumbo-ácido que são comumente as de fácil acesso e as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos.

São apresentados os princípios físico-químicos de armazenamento de energia, nas baterias chumbo-ácido, bem como os efeitos da utilização destas fora das condições à que são sujeitas. São também apresentados equipamentos destinados ao monitoramento das baterias durante os processos de carga e descarga, para evitar que elas sejam danificadas precocemente uma vez que elas elevam o custo de implementação do sistema fotovoltaico.

Abstract

Several countries with a significant amount of the population living in rural areas without access to electricity and basic social services, find a path in photovoltaic technology for human development and productive.

To ensure the sustainability of individual projects of PV systems it is necessary an active use in understanding, skills and practices of maintenance technology.

Considering the need to optimize and extend the life of the batteries for photovoltaic energy in isolated systems, this work presents the analysis and description of the technologies of energy storage, placing greater emphasis on lead-acid batteries that are commonly the easily accessible and the most commonly used in photovoltaic systems.

Shows the physical-chemical principles energy storage in lead-acid batteries, as well as the effects of these conditions on the outside of which are placed. Are also provided equipment for monitoring the battery during the charging and discharging processes, to prevent them being damage earlier since they increase the cost of implementation of the photovoltaic system.

Índice

Resumo	IV
Abstract	V
Lista de figuras	VIII
Lista de tabelas	IX
Lista de equações	X
Simbologia e Abreviaturas	XI
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 Objectivo	2
1.2 Organização do trabalho	2
Capítulo 2: Revisão Bibliográfica	3
2.1 Baterias	3
2.1.1 Conceitos básicos	4
2.1.2 Parâmetros característicos de baterias secundárias	5
2.2 Tecnologias empregadas em sistemas fotovoltaicos isolados	9
2.2.1 Baterias de Níquel-Cádmio	9
2.2.2 Baterias de Níquel-Metal Hidreto	10
2.2.3 Baterias de Iões de lítio	10
2.2.4 Baterias de chumbo-ácido	11
2.3 Estrutura e componentes da bateria chumbo-ácido	12
2.4 Tipos de bateria chumbo-ácido	14
2.4.1 Baterias automotoras	14
2.4.2 Baterias traccionárias	15
2.4.3 Baterias estacionárias	15
2.5 Armazenamento e fornecimento de energia nos sistemas fotovoltaicos isolados	18
2.5.1 Princípios de funcionamento da bateria chumbo-ácido	18
2.5.2 Efeitos da sobrecarga	21
2.5.3 Efeitos de descarga excessiva	22

2.5.4	Efeitos do processo cíclico -----	24
2.5.5	Efeitos da temperatura -----	25
2.6	Tensão de uma bateria chumbo-ácido -----	26
2.6.1	Tensão de descarga ou de corte -----	26
2.6.2	Tensão de flutuação ou normal -----	26
2.6.3	Tensão de equalização ou recarga -----	26
2.6.4	Tensão de sobretensão ou sobrecarga -----	26
2.7	Elemento de regulação de carga da bateria chumbo-ácido -----	27
2.7.1	Reguladores Série -----	27
2.7.2	Reguladores Paralelo -----	28
2.7.3	Reguladores MPP -----	29
2.8	Métodos de carga da bateria chumbo-ácido -----	29
2.9	Dimensionamento do sistema de armazenamento de energia -----	32
Capítulo 3: Conclusão -----		35
Referências Bibliográficas -----		36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema simplificado de uma célula de bateria -----	4
Figura 2. Curva de descarga de uma bateria de chumbo ácido do fabricante Moura-----	6
Figura 2.1 Expectativa de vida útil em função da temperatura de operação -----	8
Figura 2.2 Relação entre o número de ciclos e a profundidade de descarga-----	8
Figura 2.3 Estrutura de uma Bateria Chumbo-ácido selada -----	13
Figura 2.4 Elemento de bateria ventilada -----	16
Figura 2.5 Foto de bateria selada -----	17
Figura 2.6 Tecnologias da bateria VRLA -----	18
Figura2.7 Processos de descarga e carga da bateria chumbo-ácido -----	21
Figura 2.8 Etapas do processo de sulfatação -----	23
Figura 2.9 Sulfatação irreversível no eléctrodo positivo causada pela estratificação -----	24
Figura 2.10 Funcionamento de um controlador série -----	28
Figura 2.11 Funcionamento de um controlador paralelo -----	28
Figura 2.12 Funcionamento de um controlador com MPP -----	29
Figura 2.13 Curvas de corrente e tensão nos quatro estágios do processo de carga da bateria- -----	30

LISTA DE TABELAS

Tabela1.1 Comparação entre as tecnologias de baterias ----- 12

Tabela 2. Consumo para levantamento do sistema ----- 32

Lista de equações

Equação 1- Potencial do inversor -----	33
Equação 2 - capacidade da bateria -----	34

Simbologia e Abreviaturas

Ni-Cd	Níquel-Cádmio
Ni-MH	Níquel-Metal Hidreto
Li-Ion	Ião de lítio
Pb-ac.	Chumbo-ácido
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
VLA	Bateria chumbo ácido ventilada
VRLA	Bateria chumbo ácido regulada por válvula
AGM	Absorved glass mat
V_{bat}	Tensão da bateria
V/e	Volt por elemento
MPP	Ponto de potência máxima
CC/CC	Corrente contínua por corrente contínua
Ca	Corrente alternada
Cc	Corrente contínua
I_{BULK}	Corrente de carga da bateria durante o 2º estágio do processo de carga
I_{OCT}	Valor da corrente que indica que a bateria alcançou sua carga completa
I_{TC}	Corrente de carga da bateria durante o 1º estágio do processo de carga
V_{CHGEND}	Valor da tensão da bateria no limite da capacidade de descarga
V_{FLOAT}	Valor da tensão que deve ser aplicada à bateria durante o 4º estágio
V_{OC}	Valor máximo de sobrecarga de tensão que deve ser alcançado pela bateria
V_{cc}	Tensão em corrente contínua
V_{ca}	Tensão em corrente alternada
D_{total}	Consumo total de energia
Cap_{bat}	Capacidade da bateria
Aut	Dias de autonomia
Eq	Equipamento

1. INTRODUÇÃO

As pequenas propriedades rurais, particularmente as residências situadas na zona rural, em função de suas características de localização, muitas vezes em áreas distantes das redes de distribuição convencionais, aliado ao facto de apresentarem baixa demanda, não justifica, na maioria dos casos, o investimento para extensão da rede; neste contexto, apresentam-se como um espaço adequado para a aplicação dos sistemas fotovoltaicos de geração de energia, os quais proporcionam uma solução local como fonte de energia renovável, confiável, e podem promover o desenvolvimento auto sustentável, social e económico das populações na zona rural, melhorando a qualidade de vida de seus habitantes [6].

Nos países em desenvolvimento essa forma de energia deve ser aproveitada ao máximo. Normalmente esses países apresentam elevadas extensões territoriais e estão em zonas tropicais, ou seja, dispõem de alta incidência de radiação, o que torna viável o desenvolvimento da tecnologia capaz de transformar a energia solar em eléctrica, térmica, química, mecânica, etc.

Em todos SFI encontram-se baterias estacionárias, as quais deverão acumular energia em seu interior no mesmo instante em que há incidência solar nas placas semicondutoras. Em todas as baterias, o processo de armazenamento de energia eléctrica implica a transformação desta, por uma acção electroquímica, em energia química, acumulada sob esta forma. Ao ser solicitada uma corrente da bateria, a energia novamente se transforma em eléctrica descarregando-se. É necessário, portanto, a recarga da bateria, uma vez que ela é apenas um acumulador de energia.

Para garantir a sustentabilidade dos projectos de sistemas fotovoltaicos isolados faz-se necessária uma participação activa do usuário na compreensão, capacitação e nas práticas de manutenções da tecnologia.

1.1 Objectivos

O presente trabalho de pesquisa bibliográfica tem como objectivo analisar e descrever as tecnologias de armazenamento de energia usadas em SFI, dando maior ênfase à tecnologia chumbo-ácido que é comumente a mais usada.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em três capítulos.

No presente capítulo é feita uma introdução ao tema abordado, a definição dos objectivos do trabalho e a descrição da organização do mesmo.

O segundo capítulo expõe uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias de armazenamento de energia utilizadas nos sistemas fotovoltaicos isolados. Faz-se um estudo geral das baterias, iniciando com a sua classificação, apresentação da estrutura e descrição dos principais parâmetros. Também são apresentados os principais tipos de baterias disponíveis, caracterizando cada uma dessas tecnologias e esclarecendo aspectos relacionados à sua vida útil, bem como as vantagens que cada uma possui em relação a outra.

Neste capítulo é dado um maior enfoque à bateria chumbo-ácido, normalmente a mais utilizada em sistemas fotovoltaicos isolados.

Para a bateria chumbo-ácido são apresentados o seu princípio de armazenamento e fornecimento de energia com base nos processos de carga e descarga respectivamente; são também apresentados os elementos de regulação da carga e os métodos de carga da bateria, de forma a evitar danos da mesma. No final deste capítulo, são descritos os procedimentos para o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia em uma residência de baixa renda e com baixo consumo.

O terceiro capítulo relata as conclusões tiradas do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Baterias

Em sistemas fotovoltaicos isolados faz-se indispensável a utilização de um sistema de armazenamento de energia. Para isso, são comumente empregados bancos de baterias, que são dimensionados de acordo com a potência e a confiabilidade do sistema [9].

As baterias, desempenham um papel importante nos sistemas fotovoltaicos isolados para fazer face ao carácter intermitente de produção de energia eléctrica neste tipo de tecnologia. As baterias têm como função o armazenamento de energia, para que seja possível a alimentação das cargas nos períodos em que a produção é insuficiente para o efeito, e mesmo para o período nocturno que não existe produção.

As baterias, também chamadas de acumuladores electroquímicos, são classificadas em duas categorias: baterias primárias e baterias secundárias. Baterias primárias são dispositivos electroquímicos que, uma vez esgotados os reagentes que produzem a energia eléctrica, são descartadas, pois não são recarregadas. Já as baterias secundárias podem ser regeneradas, ou seja, através da aplicação de uma corrente eléctrica em seus terminais pode-se reverter às reacções responsáveis pela geração de energia eléctrica e assim recarregar novamente a bateria [13].

Os sistemas fotovoltaicos de geração de energia eléctrica utilizam acumuladores secundários, ou seja, baterias que podem ser recarregadas. As baterias empregadas em sistemas fotovoltaicos estão sujeitas às mais diversas condições operacionais, devido a geração não linear de energia pelos painéis fotovoltaicos [9].

A capacidade e as características electroquímicas dos vários tipos de baterias existentes no mercado mostram que, para um projecto, o conhecimento das baterias é fundamental para uma boa escolha. Pois em qualquer sistema fotovoltaico com acumuladores, a escolha do tipo de bateria empregada ditará o sucesso ou fracasso do projecto. Assim este capítulo é dedicado ao estudo, em conceitos práticos, sobre o uso de baterias em sistemas fotovoltaicos, dando maior ênfase às baterias de chumbo-ácido.

2.1.1. Conceitos básicos sobre baterias

As baterias são uma forma de armazenamento de energia, pois são capazes de transformar directamente energia eléctrica em energia potencial química e posteriormente converter, directamente, a energia potencial em eléctrica.

Cada bateria é composta por um conjunto de células electroquímicas ligadas em série de modo a obter a tensão eléctrica desejada [7]. Uma célula é um dispositivo electroquímico capaz de suprir, para um circuito eléctrico externo, a energia resultante de uma reacção química interna.

Uma célula, elemento básico de uma bateria, é constituída essencialmente por dois eléctrodos metálicos, um ânodo e um cátodo, imersos num electrólito, um ácido ou base, contido num vazo. Quando é acoplado aos terminais dos eléctrodos um circuito externo, uma carga ou uma fonte de tensão, dão-se reacções de oxidação-redução entre os eléctrodos e o electrólito, que promovem trocas iónicas entre estes elementos fazendo com que circule no circuito externo uma corrente eléctrica [8]. Na figura 1.1, observa-se um esquema simplificado de uma célula de bateria.

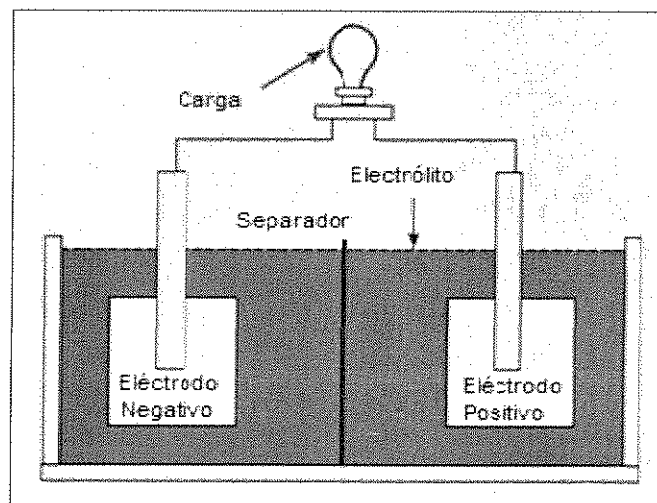


Figura 1.1 Esquema simplificado de uma célula de bateria [13]

Durante a descarga da bateria, o ânodo contribui com electrões para oxidação, no qual gera iões positivos. Similarmente, o cátodo gera iões negativos no processo de aceitar electrões. O separador, entre o ânodo e o cátodo, enquanto permite o fluxo livre dos iões, o fluxo de electrões é forçado a realizar-se pelo circuito externo, completando o circuito. Em uma célula recarregável o processo é reversível.

Tipicamente, o ânodo é feito de um metal base, enquanto o cátodo é formado de um óxido metálico, contudo, isto não é uma regra generalizada. Uma bateria recarregável pode ser literalmente obtida com a combinação de centenas de elementos e composta na presença de vários tipos de electrólitos, os quais podem produzir corrente [14].

2.1.2 Parâmetros característicos de baterias secundárias

Os conhecimentos das características das baterias facilitam-nos na escolha destas para o uso em sistemas à que elas são destinadas. Em seguida são apresentadas as principais características fornecidas pelos fabricantes.

- **Capacidade da bateria**

É a quantidade de energia que uma bateria pode fornecer quando descarregada de forma uniforme ao longo de um dado período de tempo numa determinada taxa de descarga e temperatura [6]. Ela é normalmente definida em Amperes-hora (Ah).

Dependendo do modelo da bateria a capacidade é indicada para diferentes tempos de descarga e para diferentes valores finais de tensão por célula. Os valores padrões de intervalo de tempo definidos pelos fabricantes são 5h, 10h e 100h, e as designações das capacidades para os respectivos tempos serão C_5 , C_{10} e C_{100} , onde o índice subscrito indica o tempo de descarga.

A capacidade da bateria é uma função de taxa de carga e descarga. Ela tem uma forte dependência do tempo de descarga, diminuindo (em relação à nominal) quando o tempo é muito pequeno, isto é, quando a corrente de descarga é elevada, ou aumentando quando a corrente é pequena, onde, consequentemente o tempo para a descarga é maior [15]. O facto pode ser observado na figura 2, a curva de descarga pode ser caracterizada como o valor de tensão de pico.

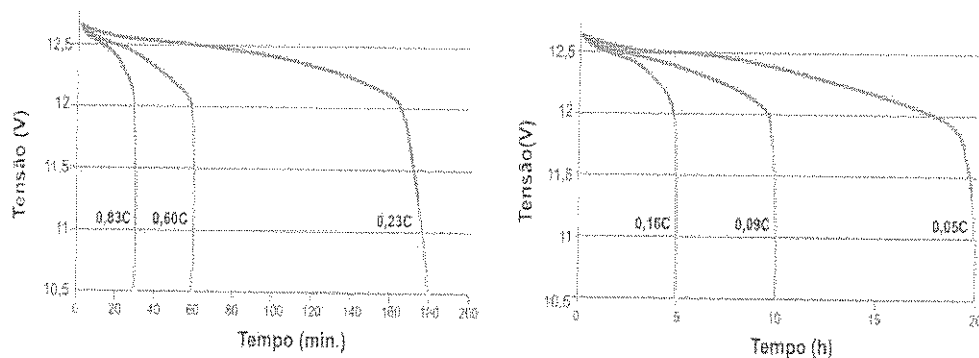


Fig.2. – Curva de descarga de uma bateria de chumbo ácido do fabricante Moura [14]

Como o comportamento da bateria não é linear, isto é, quanto maior a corrente de descarga menor será a autonomia e a capacidade, não é correcto falar em bateria de 100 Ah. Deve-se falar, por exemplo em uma bateria de 100 Ah com padrão de descarga de 20h com tensão de corte 10.5 V, o que também pode ser escrito como $C_{20} = 100 \text{ Ah}$, $V_{\text{corte}} = 10.5\text{V}$. Isto significa que a bateria permitirá uma descarga de $100/20 = 5\text{A}$ durante 20h após as quais a tensão nos terminais da bateria será de 10.5V [15].

- Taxa “C” (C-rate)

É uma medida de corrente de carga ou descarga, em termos da capacidade nominal da bateria em uma hora [14].

A taxa C é definida em Amperes, uma capacidade definida num regime de descarga 1C é aquela se obtém ao aplicar uma corrente de descarga em valor igual à capacidade declarada. Por exemplo, uma bateria com capacidade nominal em regime de descarga de 1 hora, declarada na sua etiqueta de identificação igual a 1 Ah, deverá suportar uma descarga com corrente de 1 A durante 1 hora [4] [10].

As baterias chumbo-ácido não operam perfeitamente à uma taxa de descarga de 1 C. Estas são especificadas em regimes de descarga de 5, 10 e 20 horas, o que equivale a taxas de descarga de 0.2, 0.1 e 0.05 da capacidade declarada, respectivamente [4].

- Taxa de auto-descarga

Quantidade de carga perdida pela bateria, expressa em percentagem, mesmo quando esta não está em funcionamento. É resultante de correntes internas na bateria, os fabricantes indicam usualmente a carga perdida por dia ou mês.

- Profundidade de descarga (DOD- Depth of Discharge)

A profundidade de descarga indica, em termos percentuais, quanto da capacidade nominal da bateria foi retirado a partir do estado de plena carga. Por exemplo, a remoção de 25 Ah de uma bateria de capacidade nominal de 100 Ah resulta em profundidade de descarga de 25 %. O DOD é o valor complementar do estado de carga [15].

A medida do DOD é relacionada pelos fabricantes com a tensão da bateria. Quanto menor a tensão maior a profundidade de descarga; Quanto menor o tempo de descarga mais profunda pode ser essa descarga; Quanto mais profunda for a descarga menor será o número de ciclos que a bateria irá durar [11].

Existem baterias chumbo-ácido de baixa profundidade de descarga, empregada principalmente em automóveis, e baterias de alta profundidade de descarga, que são as mais indicadas para aplicações nos sistemas fotovoltaicos de geração de energia eléctrica [13].

- Tempo de Vida Útil

Representa o número de vezes que uma bateria pode ser carregada e descarregada até que a sua capacidade de carga não consiga ir além de 80% da capacidade de carga nominal. Em geral o tempo de vida útil depende das condições em que a bateria funciona, varia com a corrente de descarga, a temperatura de funcionamento ou a profundidade de descarga [11].

A vida útil de uma bateria que opera em paralelo pode ser expressa em tempo de serviço, já a de uma bateria que opera ciclicamente é dada em quantidade de ciclos.

Como se observa na Figura 2.1 o tempo de vida útil é máximo para uma temperatura de funcionamento de 25°C sendo progressivamente reduzido para temperaturas mais elevadas. Na Figura 2.2 constata-se que o tempo de vida útil é reduzido de forma exponencial com o aumento da profundidade de descarga.

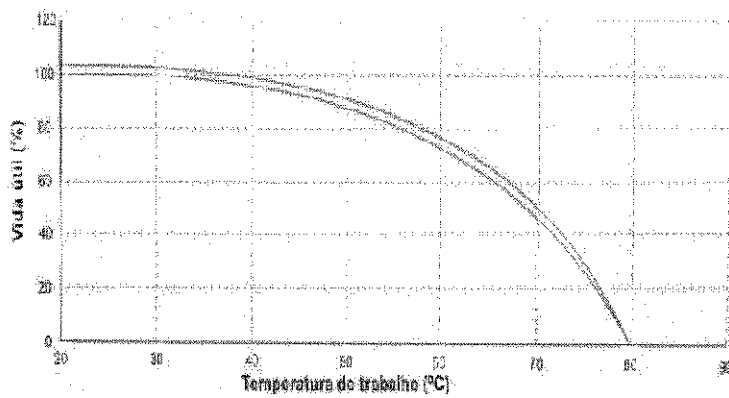


Figura 2.1-Expectativa de vida útil em função da temperatura de operação [11]

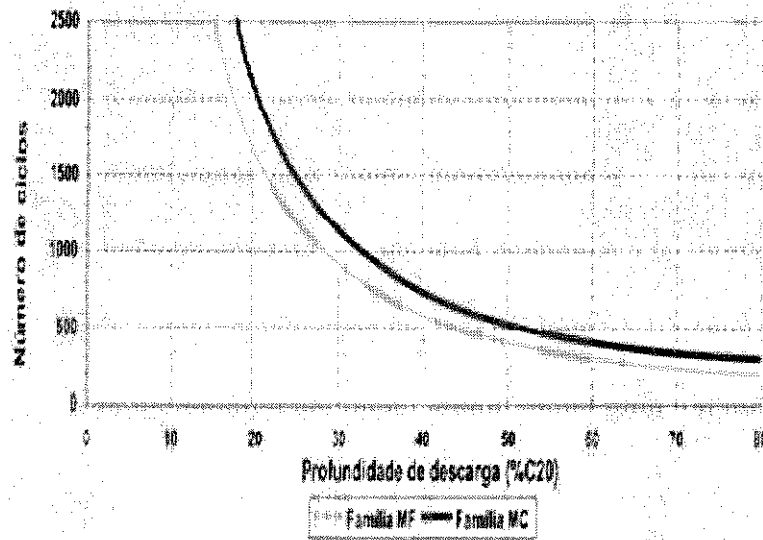


Figura 2.2 Relação entre o número de ciclos e a profundidade de descarga [11]

- Densidade de Energia

É definida como a quantidade de energia armazenada por unidade de volume ou peso. É usualmente medida em Watt-hora por quilograma (Wh / Kg).

- Energia específica

É a quantidade de energia que uma bateria pode fornecer por unidade de massa para uma dada taxa de descarga.

- **Rendimento das Baterias**

Estão presentes alguns tipos de perdas associadas à tecnologia utilizada nas baterias pelo que o seu rendimento é sempre inferior a 100%.

Verifica-se que alguma da energia dispendida no carregamento é dissipada entre outros sobre a forma de calor. Observa-se também que a carga da bateria vai diminuindo ao longo do tempo apesar de esta não ser utilizada. Esta diminuição da capacidade é fortemente influenciada pela temperatura de armazenamento da bateria. As perdas totais da bateria variam de tecnologia para tecnologia e de acordo com as condições de funcionamento, mas é frequente considerar no dimensionamento perdas de aproximadamente 20%.

2.2. Tecnologias empregadas em sistemas fotovoltaicos isolados

Os tipos de baterias existentes apresentam características distintas no que diz respeito aos seus parâmetros característicos. Para sistemas fotovoltaicos isolados, a escolha do tipo de bateria a ser utilizada deve ter em conta as características anteriormente mencionadas, bem como os factores ligados à segurança e ao mínimo impacto ambiental. Entre os vários tipos de baterias recarregáveis, são a seguir citadas as tecnologias mais utilizadas.

2.2.1. Baterias de Níquel-Cádmio (Ni-Cd)

Nesta tecnologia a célula de Ni-Cd é composta por um ânodo metálico de cádmio, um cátodo de óxido de níquel e um electrólito de hidróxido de potássio, que tem como função principal transferir cargas eléctricas entre os eléctrodos. Diferentemente do electrólito da bateria chumbo-ácido, o electrólito da bateria Ni-Cd não participa das reacções.

Comparativamente à bateria chumbo-ácido a bateria Ni-Cd possui maior densidade de energia e maior vida útil. O segredo da sua durabilidade está no material das placas, que é de aço sólido, relativamente imune aos agentes químicos onde estão imersas, mantendo inalterada a integridade mecânica e a condutividade eléctrica da célula por toda sua vida útil. Essa característica faz com que o seu custo elevado seja compensado ao longo de alguns anos. Possuem também a vantagem de serem menos afectadas por sobrecargas e podem ser totalmente descarregadas, não estando sujeitas a

sulfatação e o seu carregamento não sofre influência da temperatura, ou seja, possuem menor susceptibilidade à variação da temperatura. Possuem ainda a vantagem de possibilitarem a sua carga com correntes elevadas o que conduz a um menor tempo de carga.

Para além do seu preço inicial elevado, a maior desvantagem deste tipo de bateria é a redução da capacidade de recarga, sendo afectadas pelo “efeito memória”. Isso acontece quando a célula é parcialmente descarregada e em seguida é carregada por um longo período, excedendo o limite da energia removida durante a descarga parcial. Para solucionar este problema, na carga de uma bateria Ni-Cd são geralmente utilizados carregadores ditos “inteligentes”, os quais possuem dispositivos para descarga antes da recarga, bem como um sistema aperfeiçoado de monitorização de carga, o que também eleva o preço [14]. Outra maior desvantagem das baterias Ni-Cd é a sua toxicidade, o cádmio é um metal altamente tóxico, pelo que o seu uso tem vindo a ser questionado por razões ambientais.

2.2.2 Baterias de Níquel-Metal Hidreto (Ni-MH)

A bateria Ni-MH pode ser considerada como uma extensão da tecnologia da bateria Ni-Cd, mas com algumas diferenças. A maior diferença está na construção do seu ânodo, que é feito com hidreto metálico e não é utilizado cádmio. Contudo, o benefício mais positivo desta bateria é não possuir o “efeito memória”.

Os aspectos negativos desta bateria são: alto custo, baixa capacidade para fornecer picos de corrente, grande risco de se danificar com a sobrecarga, e alta taxa de auto descarga [14].

2.2.3 Baterias de iões de lítio (Li-ion)

Um acumulador de iões de lítio é constituído basicamente por um cátodo de lítio, um ânodo de carbono poroso e um electrólito composto por sais de lítio num solvente orgânico (solução não aquosa) [8].

As baterias de Li-ion apresentam como maior vantagem picos de densidade de energia maior que 100 Wh/Kg e uma eficiência energética maior que as baterias à base

de chumbo ou níquel, porém a sua vida útil é menor. São muito utilizadas onde se deseja alta densidade energética e peso leve, como por exemplo em celulares e notebooks.

Podem ser carregadas com correntes altas, tal como as Ni-Cd, e suportam uma vasta amplitude de temperaturas de funcionamento [8]. Estas baterias necessitam de um controle preciso, pois possuem baixa tolerância a sobrecarga. Na descarga, se a tensão da célula cair abaixo de 2,5 V a bateria é danificada.

2.2.4 Bateria de chumbo-ácido (Pb-ac.)

As baterias de Pb-ac. têm sido fabricadas da mesma maneira há muitas décadas, pelo que é uma tecnologia bem dominada. As células das baterias Pb-ac. são compostas por placas positivas de dióxido de chumbo, placas negativas de chumbo, e pelo electrólito de ácido sulfúrico.

A elevada fiabilidade, a disponibilidade e a durabilidade associados a um custo reduzido justificam o sucesso desta tecnologia em várias áreas de aplicação. Outro factor de relevância desta tecnologia é o elevado rendimento que esta apresenta, aproximadamente 85% [11]. E não estão sujeitas ao “efeito memória”, deixar a bateria em carga flutuante durante um período prolongado não causa danos.

Nesse tipo de bateria é difícil determinar e manter o estado de carga, o que consiste em uma desvantagem. A forma de descarga e a temperatura de operação influenciam muito na durabilidade, o que pode ser solucionado com sistemas de monitorização e controladores sofisticados, juntamente com algoritmos de recarga com diferentes etapas controladas. Além disso, as baterias Pb-ac. possuem uma densidade de energia menor em relação às outras tecnologias, sendo inadequadas para aplicações onde isso seja necessário. A tabela 1.1 ilustra dados comparativos entre as tecnologias de baterias mais usadas.

Tabela1.1 Comparação entre as tecnologias de baterias [10]

Dados	Tecnologias			
	Chumbo-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Ion
Densidade de energia [Wh/Kg]	30 - 50	45 - 80	60 - 120	110 - 160
Ciclo de vida (80% da capacidade inicial)	200 - 300	1500	500 - 1000	500 - 1000
Tensão da célula [V]	2	1.25	1.25	3.6
Tensão de descarga da célula [V]	1.7	1.0	1.0	2.5
Tolerância a sobrecarga	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa
Auto descarga mensal [%]	5	20	30	10
Velocidade de carga [horas]	8 à 16	1	2 à 4	2 à 4
Temperatura de operação [°C]	-40 à 60	-20 à 60	-20 à 60	-20 à 60
Manutenção	3 à 6 meses	1 à 2 meses	2 à 3 meses	Não é necessário
Restrições ambientais	Sim	Sim	Não	Não

2.3. Estrutura e componentes da bateria chumbo-ácido

A bateria Pb-ac. é a tecnologia mais usada em sistemas fotovoltaicos isolados, absorvendo mais de 90% do mercado, devido as suas vantagens em relação às outras tecnologias [9].

As baterias de Pb-ac. são assim chamadas pois a sua matéria activa é o chumbo e seus compostos, e o electrólito é uma solução aquosa de ácido sulfúrico cuja

densidade varia conforme a sua aplicação. A faixa de variação da massa específica (densidade) do electrólito da bateria para aplicações em clima tropical deve ser de 1.240 à 1.260 g/l, e para aplicação em clima frio deve ser de 1.270 à 1.290 g/l.

A Figura 2.3 mostra a estrutura de uma bateria chumbo-ácido retirada do catálogo de baterias chumbo-ácido Moura [13].

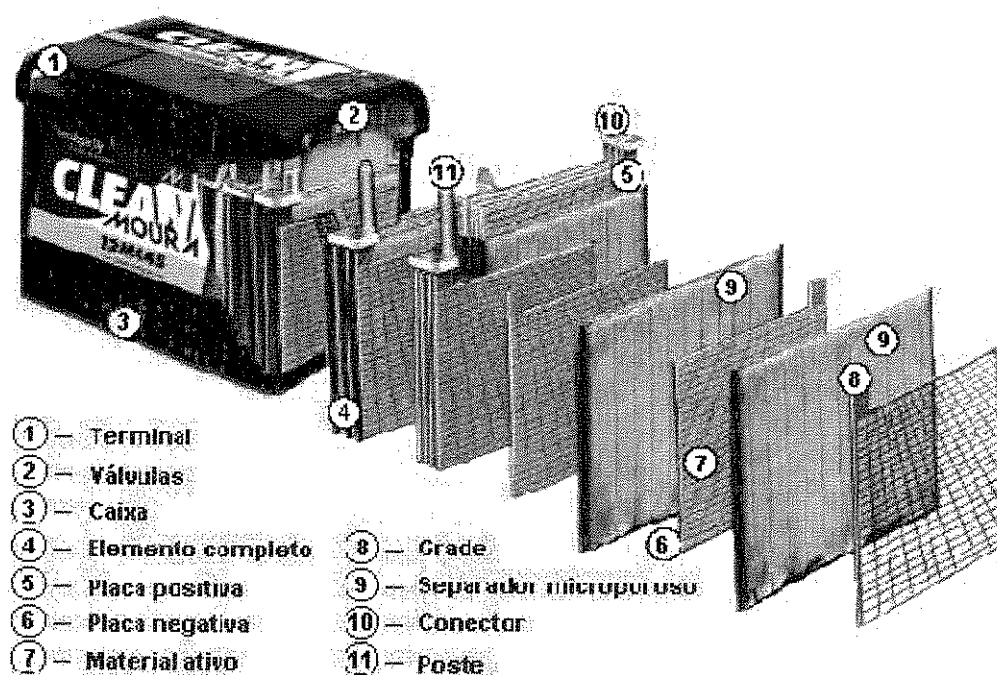


Figura 2.3 – Estrutura de uma Bateria Chumbo-ácido selada [13]

A caixa de uma bateria é composta por vasos, e tem a função de acomodar o elemento completo que é formado pelo conjunto de placas positivas e placas negativas, intercaladas entre si, e separadores.

Normalmente, a bateria é constituída por 6 elementos e cada um apresenta uma tensão nominal de 2V em circuito aberto e com plena carga. Assim, vários destes elementos são ligados em serie de modo a obter nos terminais da bateria valores de tensão desejáveis. No mercado existem baterias de Pb-ac. de 12, 24 e 48V conforme o número de elementos [7].

Denomina-se placa ao conjunto constituído pela grade e materiais activos, o material activo da placa positiva é o dióxido de chumbo () e o da placa negativa é

o chumbo esponjoso (Pb). Os materiais activos servem para o processo de oxidação e redução, ou seja, descarga e carga da bateria.

Os materiais activos têm pouca resistência física e são suportados sobre as grades de chumbo puro ou de diferentes ligas de chumbo. Assim, a grade tem como finalidade a condução eléctrica e o suporte da massa activa. Para ambas as finalidades é desejável que a grade permaneça durante toda a sua vida com a forma e dimensões originais [4].

Os conectores são responsáveis por interligar as placas da mesma polaridade dentro de um mesmo elemento completo, e de interligar cada elemento completo com seu subsequente, em série, formando as baterias de 12V.

As placas devem ficar o mais próximo possível umas das outras, reduzindo ao máximo a resistência interna devido ao espaçamento. Para evitar um curto-circuito entre as placas de polaridades opostas, introduzem-se separadores microporosos que permitem também manter uma certa reserva do electrólito no espaço entre elas facilitando a condutância electrolítica. Como a placa positiva necessita de 1,6 vezes mais ácido que a placa negativa, o lado rugoso dos separadores é colocada próximo à placa positiva para garantir maior quantidade de ácido [4].

Os separadores mais utilizados são os de polietileno microporoso, que tem a vantagem de impregnação imediata do electrólito, alta resistência mecânica, baixa resistência eléctrica e estabilidade química, além do baixo custo.

O contacto entre a bateria e o sistema eléctrico é de extrema responsabilidade dos pólos terminais.

2.4. Tipos de bateria chumbo-ácido

Dependendo do tipo de aplicação as baterias de Pb-ac. podem ser classificadas como automotoras, traccionárias ou estacionárias.

2.4.1 Baterias automotoras

São usadas principalmente no accionamento dos motores de arranque dos automóveis, devido a sua principal característica de fornecer uma alta corrente num curto intervalo de tempo. Estas baterias possuem usualmente placas muito finas, 1 mm em média, com uma área maior, projectadas para não descarregar mais do que 1 à 5% da

capacidade total. Descargas de 80% podem reduzir o tempo de vida útil da bateria para 30 a 50 ciclos.

Caso se opte em utilizar este tipo de bateria em sistemas fotovoltaicos, o ideal é limitar seu nível de descarga em apenas 10% para que não se torne rapidamente inutilizável, o que implicaria um projecto envolvendo uma grande quantidade de baterias [14] [16].

Como estas baterias são desenvolvidas para veículos, e o electrólito está em constante movimentação, não são adoptadas medidas para minimizar a sulfatação.

2.4.2 Baterias traccionárias

As baterias traccionárias são projectadas de forma que possam perder até 80% da carga total várias vezes, e possuem placas internas muito mais espessas que as de fins automotivos, cerca de 4.2 mm [14] [16].

Como as baterias traccionárias são projectadas para ciclos profundos repetidos, de carga e descarga, estas necessitam de constante manutenção que consiste essencialmente na adição da água destilada de modo a completar o volume do electrólito. Esta característica torna-a menos atractiva para outras aplicações.

Comercialmente, são encontradas como baterias de grande volume e tensões de no mínimo 48 V, sendo geralmente fabricadas sob encomenda.

2.4.3 Baterias estacionárias

As características das baterias estacionárias encontram-se num meio-termo entre as características das baterias anteriormente descritas, ou seja, possuem placas mais grossas do que as das baterias automotoras e mais finas do que as das baterias traccionárias. Como esta bateria é projectada para operar em local fixo e sem movimentação do electrólito, na sua construção leva-se em conta a minimização da sulfatação [14]. Em todos sistemas fotovoltaicos encontram-se baterias estacionárias.

Dentro desta secção de baterias, as baterias Pb-ac. dividem-se em dois grandes grupos com base no seu tipo de electrólito. A seguir são descritos os dois grupos.

a) Baterias chumbo-ácido ventiladas ou abertas (VLA)

Representam a forma mais comum das baterias Pb-ac., possuem pequenas válvulas que podem, ou não, ser removidas. Neste grupo de baterias o electrólito encontra-se no estado líquido, em solução aquosa. Tal facto, obriga ao funcionamento numa posição fixa para que não se dê o derrame do electrólito, e à reposição periódica do nível da água uma vez que durante o funcionamento da bateria, principalmente em condições de sobrecarga, se dá a electrólise da água que faz com que o oxigénio e o hidrogénio sejam libertados no estado gasoso.

Devido a emissão destes gases, estas devem ser instaladas em salas exclusivas com sistemas especiais de controle do ar ambiente e instalação eléctrica da iluminação à prova de explosão.

As baterias VLA possuem uma vida útil esperada de aproximadamente 15 anos a uma temperatura de 25°C, e de aproximadamente 12 anos a uma de 30°C [4]. Na figura 2.4 é apresentado um elemento da bateria do tipo ventilada.

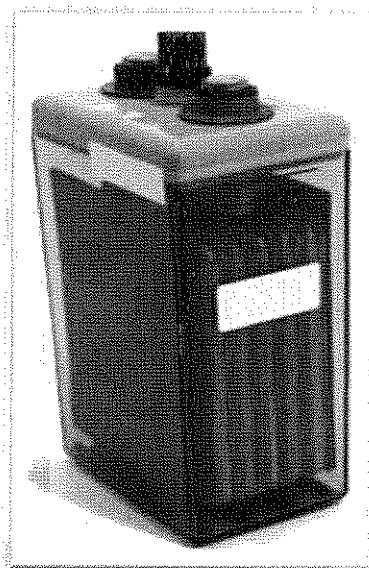


Figura 2.4 – Elemento de bateria ventilada [4]

b) Baterias chumbo-ácido estanques ou reguladas por válvulas (VRLA)

Este tipo de baterias é selado possuindo, no entanto, válvulas que permitem a saída de gases quando a pressão no interior da bateria atinge níveis perigosos. Elas podem operar em qualquer posição pois o electrólito encontra-se imobilizado.

Ao contrário das baterias VLA, as baterias VRLA são projectadas para operarem em condições de baixa sobretensão, de forma a evitar a formação excessiva de gases durante a carga. A carga em excesso pode sobrecarregar o processo de recombinação de gases e acentuar a depleção da água [4]. Na figura 2.5 é apresentada uma bateria do tipo selada.

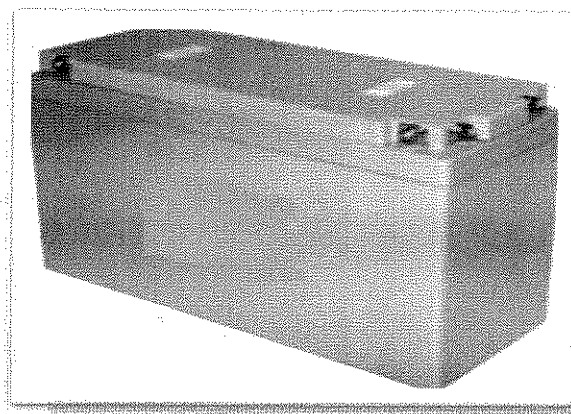


Figura 2.5 Foto de bateria selada [4]

As baterias VRLA possuem problemas associados à sua utilização em altas temperaturas. Elas necessitam de um ambiente controlado, com temperaturas em torno dos 25°C, uma vez que estas apresentam uma degradação acelerada em altas temperaturas [14].

A solução para este problema, é a utilização de baterias com válvulas que possuem membranas de permeabilidade selectiva, estas convertem o hidrogénio e o oxigénio, reduzindo a perda de água em até 90% [14].

De uma maneira geral, as baterias VRLA apresentam face às VLA a vantagem de permitirem a recombinação dos gases, reduzindo as perdas de água, o que faz com que não necessitem de manutenção. O princípio consiste em deixar passar o oxigénio do pólo positivo ao pólo negativo (ver figura 2.6)

Dentro das baterias do tipo VRLA distinguem-se ainda duas tecnologias:

➤ **Baterias de gel**, em que o ácido encontra-se misturado com sílica conferindo ao electrólito a consistência de um gel, o que mantém o electrólito imóvel no interior da bateria [8].

➤ **Baterias AGM** (Absorbed Glass Mat), utilizam um separador especial de microfibras de vidro muito poroso que absorve o electrólito, o que evita que este se desloque livremente no interior da bateria. Este tipo de baterias possui características semelhantes às das baterias de gel, possuindo também baixas taxas de carga e descarga [8]. Na figura 2.6 podemos observar as referidas tecnologias.

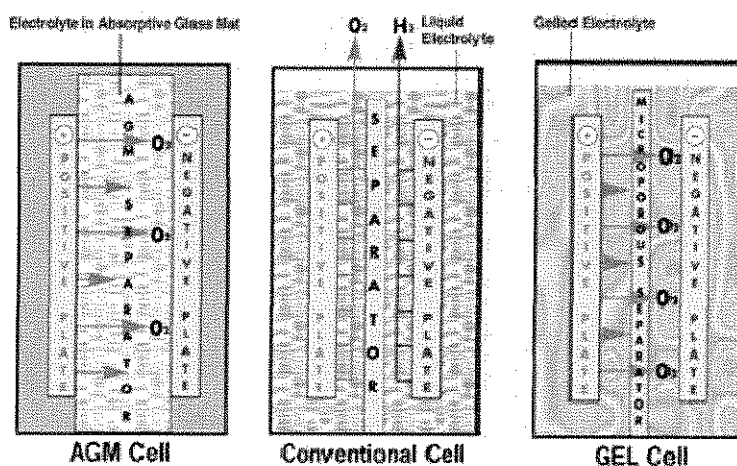


Figura 2.6 – Tecnologias da bateria VRLA [3]

2.5. Armazenamento e fornecimento de energia nos SFI

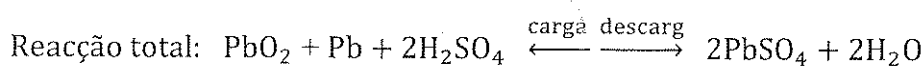
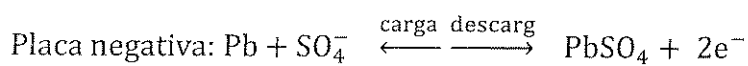
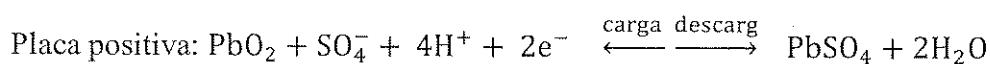
2.5.1. Princípio de funcionamento das baterias de Chumbo-ácido

As reacções electroquímicas que ocorrem no interior da bateria Pb-ac. são responsáveis pelo armazenamento de energia e um futuro fornecimento ao sistema quando esta for necessária. Estas reacções são denominadas redox. Elas ocorrem em simultâneo, uma na placa positiva e outra na placa negativa de uma célula, durante os processos de carga e descarga.

Antes da descarga da bateria, a matéria activa da placa negativa é o chumbo esponjoso (Pb) e da placa positiva é o peróxido de chumbo (PbO₂). Ou seja, as placas encontram-se na fase correspondente ao estado carregado.

No electrólito, as moléculas da água agem sobre as moléculas do ácido sulfúrico dissociando-o em iões de hidrogénio (positivos) e iões de sulfato (negativos). Como a soma das cargas dos iões positivos de hidrogénio é igual a soma das negativas do sulfato, a solução é electricamente neutra. A decomposição da molécula em iões pela acção da água denomina-se dissociação electrolítica.

Este processo de dissociação electrolítica dá-se devido a fraca força de ligação das moléculas do ácido sulfúrico em relação as moléculas da água, e ocorre independentemente de haver ou não placas submersas no electrólito. As reacções electroquímicas que ocorrem nas placas são descritas a seguir:



- **Processo de descarga**

Durante a descarga, na placa negativa, um anião ácido (SO₄⁻) que se encontra livre no electrólito combina-se com o chumbo (Pb) formando sulfato de chumbo (PbSO₄) e libertando dois electrões, os quais irão a placa positiva da bateria através do circuito externo (carga) ligado a ela. Esta é, portanto, a reacção química que liberta a carga eléctrica, isto é, que transforma a energia química em eléctrica. Em simultâneo, na placa positiva, o óxido de chumbo (PbO₂) reage com o anião ácido (SO₄⁻), mais quatro iões de hidrogénio (H⁺) juntamente com os dois electrões vindos da placa negativa via circuito externo, gerando como produtos sulfato de chumbo (PbSO₄) e água (H₂O). A água produzida nesta reacção vai diminuir a concentração do ácido sulfúrico (H₂SO₄) no electrólito e consequentemente a tensão da bateria, ou seja, o ácido sulfúrico é consumido e a água é formada.

Quando a carga da bateria se aproxima do valor mínimo recomendado e as condições do circuito requerem uma situação de além descarga, o estado de subcarga é alcançado. Este é caracterizado por uma diminuição acentuada da densidade interna electrolítica causando a sedimentação no fundo dos elementos da bateria, ou seja, a sulfatação [6].

- **Processo de carga**

Durante o processo de carga, a corrente circula em sentido oposto ao da descarga através de uma fonte externa de tensão, e as reacções ocorrem de maneira invertida.

Na placa negativa, o sulfato de chumbo (PbSO_4) reage com os dois electrões vindos de uma fonte externa, produzindo chumbo e o anião ácido (SO_4^-). E na placa positiva, o sulfato de chumbo (PbSO_4) reage com água (H_2O) produzindo novamente óxido de chumbo (PbO_2), o anião ácido (SO_4^-), quatro iões de hidrogénio (H^+) e dois electrões voltam à fonte presente no circuito externo. Neste processo, a água é consumida e o ácido sulfúrico é formado novamente aumentando sua concentração no electrolito e consequentemente a tensão da bateria.

Quando a bateria estiver praticamente carregada e a maioria do ácido sulfúrico tiver sido transformado em chumbo (Pb) e óxido de chumbo (PbO), dá-se início a produção dos gases oxigénio (O_2) e hidrogénio (H_2). Esse facto ocorre devido a sobrecarga, ou seja, devido ao consumo completo de toda a matéria activa disponível nas placas positivas, de forma que parte da corrente necessária para produzir a reacção característica é utilizada no processo de decomposição da água. Em síntese dá-se início ao fenómeno denominado gaseificação. Quando esta etapa for atingida, a tensão da bateria é incrementada e, posteriormente, estabilizada [12].

O processo de carga é considerado finalizado quando a tensão da bateria e a densidade relativa do electrolito permanecem constantes por um período de três horas. Os processos acima descritos podem ser melhor visualizados na figura 2.7

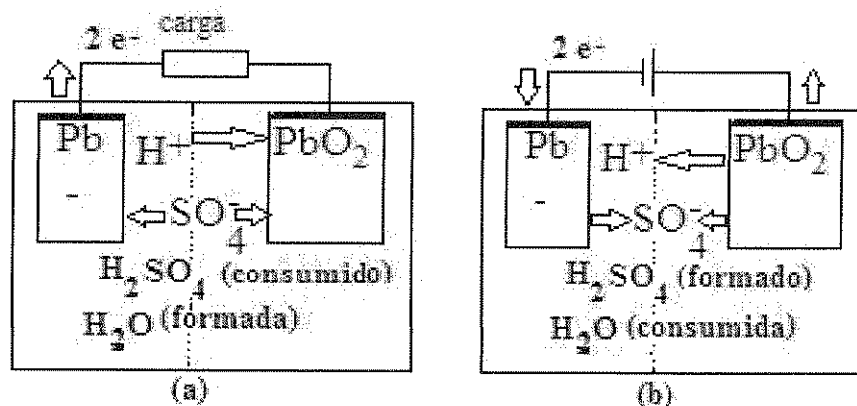


Fig.2.7: Processos de descarga(a) e carga (b) da bateria chumbo-ácido

Mais rigorosamente, quando a célula está completamente carregada a sua tensão é aproximadamente 2,12V e quando está totalmente descarregada a tensão é de aproximadamente 1,8V. Portanto uma bateria de 12V vai ter uma tensão, aproximadamente, de 12,7V quando totalmente carregada e uma tensão de 10,8V quando descarregada, o que dá uma variação total de tensão de 1,9 V.

2.5.2 Efeitos da sobrecarga

Os efeitos decorrentes do excesso de carga, ou sobrecarga, podem ocasionar consequências positivas ou negativas no interior da bateria. As consequências positivas estão relacionadas à necessidade de se equalizar as células que compõem o acumulador, ou seja, é necessário realizar a homogeneização ou agitação do eletrólito, por meio das bolhas dos gases criados pela gaseificação, para que o fenómeno de estratificação seja minimizado.

Em relação as consequências negativas o excesso de carga leva a perda de água no eletrólito. O que faz com que ao passar do tempo as placas fiquem secas caso esta não seja reposta durante muito tempo, causando danos irreversíveis a bateria [12].

O outro aspecto negativo é a corrosão do eléctrodo positivo pela transformação do chumbo metálico em óxidos de chumbo, PbO_x, o que leva ao aumento da resistência interna da bateria e perda do material activo no eléctrodo [11]. Este processo de oxidação pode ser intensificado pelo aumento da temperatura acarretado pela gaseificação e, consequentemente, o tempo de vida da bateria pode ser reduzido [12]. A

gaseificação consome parte da corrente de carga, que não poderá ser disponibilizada na próxima descarga diminuindo, assim, a eficiência do carregamento.

Certas medidas podem ser tomadas com vista à minimização ou resolução das questões anteriores. Para minimizar o aumento da resistência interna são utilizados em uma liga juntamente com o chumbo a prata (por ser excelente condutor), cálcio ou selénio, que minimizam a corrosão e a taxa de gasificação a ponto de não ser necessário preencher o electrólito regularmente com água [9] [11].

Para usufruir a sobrecarga sem que esta danifique a bateria é necessário limitar esse processo, no final do carregamento, a um valor de tensão que está compreendido entre 14.1V e 14.7V para uma temperatura de 25°C [12].

2.5.3 Efeito da descarga excessiva

Um dos efeitos causados tanto pela descarga profunda quanto pela inactividade da bateria (que é mantida em baixo estado de carga) é o processo denominado sulfatação. A sulfatação se processa devido a formação de cristais de sulfato de chumbo nas superfícies das placas da célula, quando estas operam fora das condições normais. Os cristais vão se acumulando sobre as placas formando uma barreira entre o electrólito e o material activo das placas [9] [12].

A primeira identificação do processo de sulfatação geralmente ocorre quando a bateria parece carregar-se rapidamente em decorrência da elevada tensão de carregamento; porém, mediante a reactivação de uma medida de peso específico da bateria, é possível constatar que o estado de carga se encontra baixo. Um procedimento usado para se tentar reverter essa situação, minimizando os possíveis danos causados pela sulfatação, pode ser feito aplicando à bateria uma corrente lenta durante o carregamento. Contudo, mesmo assim, a capacidade da bateria se reduzirá irreversivelmente. A figura 2.8 mostra as etapas do processo de sulfatação.

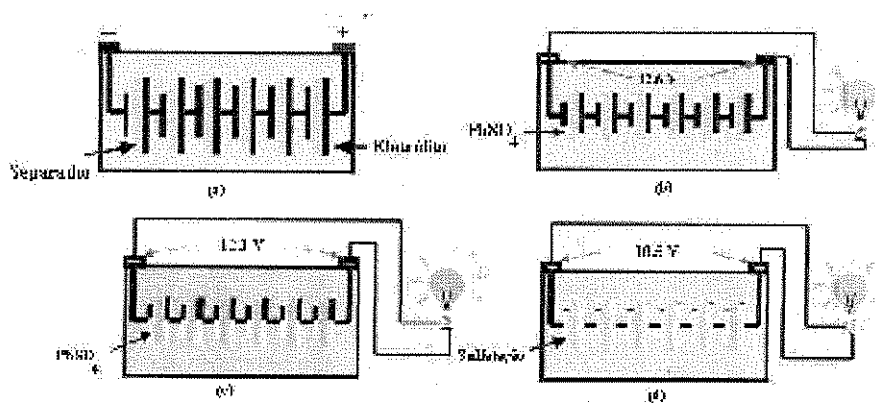


Figura 2.8 Etapas do processo de sulfatação: (a) Bateria com plena carga; (b) Formação de PbSO_4 ; (c) Aumento de PbSO_4 no decorrer da descarga; (d) Descarga profunda, sulfatação [12]

De início a presença de espaços vazios, próximos a cada cristal de sulfato de chumbo, facilita a movimentação do electrólito através da matéria existente. Contudo, progressivamente, os pequenos cristais de sulfato de chumbo recombinaem-se e recristalizam-se formando cristais maiores que não foram decompostos durante o recarregamento impedindo a transformação em chumbo e óxido de chumbo, ou seja, perde-se a matéria activa da reacção e, com isso, diminui-se a capacidade da bateria. Além disso, o sulfato de chumbo, por ser um mau condutor eléctrico, produz o aumento da resistência da bateria dificultando ainda mais a passagem da corrente eléctrica gerada pela mesma [12].

Para minimizar a sulfatação deve-se evitar manter a bateria descarregada por longos períodos de tempo, carregamentos parciais prolongados e a operação continua em temperaturas acima de 45°C [12].

A utilização de aditivos nas matérias activas e utilização, em lugares onde a temperatura média está acima de 30°C , de um electrólito tropical que possui baixa concentração do ácido, também reduzem a taxa de sulfatação.

Nas aplicações de ciclos profundos os fabricantes recomendam que a bateria, após sofrer a descarga, seja recarregada imediatamente. Entretanto, isto não é possível quando a descarga profunda é resultado de tempo nublado. Neste caso, é necessário reduzir consumo, durante alguns dias, ou então recarregar a bateria por meio de outras fontes.

2.5.4 Efeitos do processo cíclico

A constante transformação de óxidos de chumbo em sulfato de chumbo e vice-versa (), durante a descarga e carga respectivamente, provoca a degradação do eléctrodo positivo devido a fadiga mecânica. Este processo pode levar á ruptura do eléctrodo.

Para evitar a fadiga mecânica é utilizado antimónio na construção dos eléctrodos, para aumentar a resistência mecânica das placas [11]. Contudo, o aumento da vida útil da bateria através destes processos tem como inconveniente a diminuição da manutenção da carga.

Para além da degradação do eléctrodo positivo, a estratificação é o outro efeito decorrente dos constantes ciclos de carga e descarga. Neste processo, ocorre a divisão do electrólito em camadas de diferentes densidades provocando a redução da capacidade da bateria. À medida que o processo avança, a distribuição irregular do ácido no electrólito faz com que o ácido gerado na parte superior seja depositado na parte inferior da bateria, até que a diferença entre as concentrações se torne critica e se estabilize.

Segundo Matera et al. (2003), a estratificação do electrólito ocorre no carregamento da bateria e vai aumentando à medida que o processo progride, isto é, diminui no começo da descarga e aumenta no final. A parte inferior das placas fica extremamente descarregada e com dificuldades de carregamento, contribuindo, assim, para que a bateria conviva com diferentes estados de carga em seu interior [12].

A gaseificação, ou seja, a intensificação da produção dos gases que agitam o electrólito contribuem para a redução do processo de estratificação que leva à sulfatação irreversível nas partes inferiores [11] [12]. Na figura 2.9 observa-se a sulfatação irreversível.



Figura 2.9 Sulfatação irreversível no eléctrodo positivo, causada pela estratificação: (a) na parte inferior e no borne; (b) intensificação da degradação; (c) perda da matéria activa [12]

Estado de flutuação ou normal: $V_{bat} \sim 2.20 \text{ V/e}$;

Estado de equalização ou recarga: $V_{bat} \sim 2.40 \text{ V/e}$;

Estado de sobretensão ou sobrecarga: $V_{bat} > 2.70 \text{ V/e}$;

A seguir serão apresentados os conceitos de cada um desses estados.

2.6.1 Tensão de descarga ou de corte

Consiste na tensão em que a bateria é considerada descarregada. Uma descarga profunda causaria a danificação da bateria através do processo de sulfatação.

2.6.2 Tensão de flutuação ou normal

É a tensão aplicada à bateria para evitar a autodescarga, ela mantém a bateria carregada e pronta para fornecer energia quando necessário. Portanto, esta tensão deve ser elevada o suficiente para evitar a autodescarga. Mas ao mesmo tempo, não pode ser elevada em demasia de maneira que haja uma corrente de flutuação muito maior e provoque desgaste das placas e redução da vida útil [1] [4].

A maioria das baterias Pb-ac. possuem uma tensão de flutuação de ordem de 2,20 a 2,25 V/e a uma temperatura ambiente de 25°C [1].

2.6.3 Tensão de equalização ou recarga

É na tensão de equalização ou recarga que a bateria passa do estado de recarga para o estado de flutuação. Esse valor depende da corrente de carga e da temperatura. A equalização é aplicada nos casos em que há um conjunto de baterias (banco de baterias) interligadas em série ou em paralelo com tensões individuais diferentes. A finalidade da carga de equalização é de nivelar as tensões de cada componente do banco e também o seu estado de carga [1] [4].

2.6.4 Tensão de sobretensão ou sobrecarga

A partir deste nível de tensão a bateria encontra-se em sobrecarga, deve-se tomar cuidado para que a bateria não seja danificada por esse motivo.

2.7 Elemento de regulação de carga da bateria

A utilização de módulos fotovoltaicos para produção de energia eléctrica em sistemas isolados faz-se acompanhar, na maioria das vezes, do uso de sistemas de armazenamento de energia, tipicamente baseados em baterias. Para assegurar o correcto funcionamento deste tipo de baterias é necessário monitorar o estado de carga das mesmas e, deste modo, controlar a tensão durante o processo de carga das mesmas para que não ocorram situações de sobrecarga e, durante o processo de descarga, desligar as cargas sempre que a profundidade máxima de descarga seja atingida. Estas funções são desempenhadas por reguladores ou controladores de carga, que podem assumir diferentes configurações [8].

Os controladores de carga são dispositivos electrónicos que controlam o fluxo de potência entre os painéis fotovoltaicos, as baterias e a carga [9].

Os controladores de carga são compostos por um circuito de controle e outro de manutenção. Tendo em conta que a tensão máxima de carga e mínima de descarga da bateria dependem do seu estado de carga, o circuito de controle monitoriza a tensão, corrente e também a temperatura da bateria, processa essas informações e gera sinais de controle para o circuito de comutação. O circuito de comutação é formado por dispositivos semicondutores de potência que controlam a tensão e/ou corrente de carga ou descarga das baterias [7] [13].

O circuito de controle é a parte fundamental dos controladores de carga, pois é através dele que se pode definir uma estratégia de controle adequado para o tipo e modo da bateria empregada no sistema, maximizando a durabilidade da bateria e aumentando a confiabilidade do sistema [13].

Existem basicamente dois tipos de controladores de carga, os que são ligados em série e os que são ligados em paralelo.

2.7.1 Reguladores Série

A designação advém da posição dos interruptores electrónicos em relação ao módulo fotovoltaico, sendo que estes se encontram em série [8].

O controle dos processos de carga e descarga é feito pela comutação dos interruptores electrónicos, isolando o módulo fotovoltaico das baterias quando estas se encontram completamente carregadas e, desligando as cargas das baterias quando,

durante o processo de descarga, é atingida a profundidade máxima de descarga [7] [8], como mostrado na figura 2.10

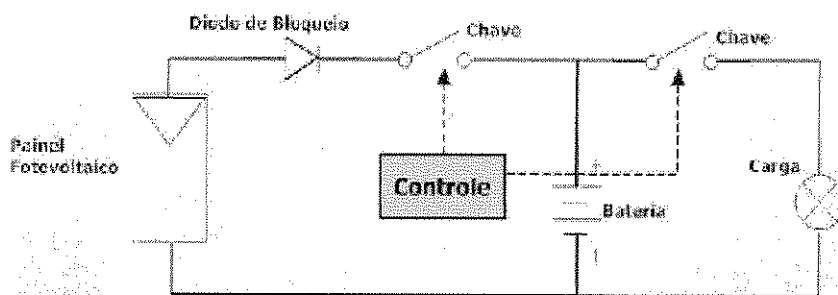


Figura 2.10 Funcionamento de um controlador serie [16]

2.7.2 Reguladores Paralelo

A sua constituição é semelhante à dos reguladores série, a principal diferença reside no facto de um dos interruptores electrónicos ser colocado em paralelo com o módulo fotovoltaico. Deste modo, a carga é controlada curto-circuitando momentaneamente o módulo fotovoltaico [8] como mostrado na figura 2.11

Esse método consome menos energia e é mais eficiente com as baterias, sendo comumente o mais utilizado [16].

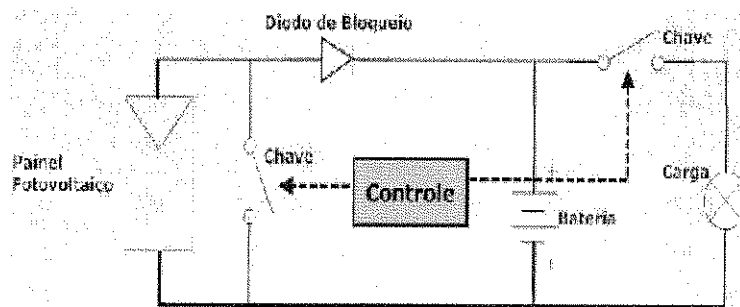


Figura 2.11 Funcionamento de um controlador paralelo [16]

Os controladores de carga em paralelo e em série nem sempre conseguem fazer o melhor aproveitamento da energia solar disponível. As perdas de energia podem ser da ordem dos 10% aos 40%, dependendo da tensão da bateria, da radiação e da temperatura. Estas perdas podem ser evitadas utilizando um sistema de rastreio do MPP (ponto de potência máxima), que consiste essencialmente num conversor CC/CC

regulado [7]. O conversor CC/CC é regulado de forma a ajustar o sinal de saída em função de carga da bateria.

2.7.3 Regulador MPP

Este tipo de regulador é o mais adequado para sistemas fotovoltaicos em que se pretende tirar o máximo partido do módulo fotovoltaico a utilizar. A função deste tipo de regulador é pesquisar o ponto de potência máxima e impor ao módulo a tensão correspondente a esse ponto, garantindo assim que o sistema opere sempre, pelo menos, em torno desse ponto [8] como mostrado na figura 2.12

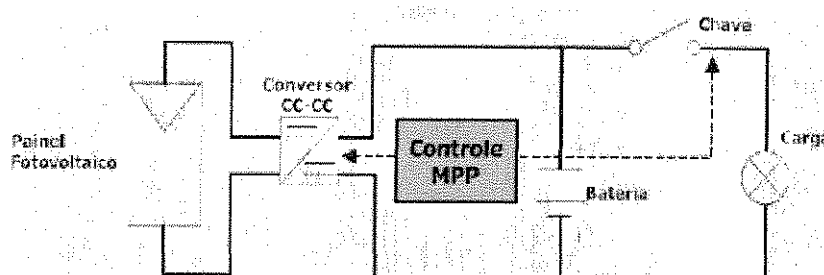


Figura 2.12 Funcionamento de um controlador com MPP [16]

2.8 Método de carga da bateria chumbo-ácido

Existem vários métodos que podem ser utilizados para fazer a carga da bateria, a selecção de um determinado método deve sempre ter em conta o tipo de bateria em que este será aplicado. Muitas vezes é necessário o monitoramento da tensão, corrente e temperatura da bateria. Dependendo dos valores que cada uma dessas variáveis assumir, a vida útil da bateria pode ser comprometida. Tendo isso em vista, o sistema de controle de carga deve actuar de maneira que essas situações indesejadas não aconteçam.

Caso a temperatura não seja monitorada, à 25°C teremos sucesso no processo de carga, porém abaixo dessa temperatura a carga não se completará. Já acima de 25°C, o sistema ainda estará impondo uma condição de carga na bateria que já estará sendo danificada por sobrecarga [1].

Portanto, providenciar o carregamento completo da bateria exige do controlador uma elaborada estratégia de controle na qual seja possível carregar a bateria, dentro dos seus limites, o mais rápido possível já que o período diário de geração de energia pelo painel fotovoltaico é limitado.

Basicamente, existem dois principais métodos de carga para as baterias Pb-ac.: método de carga por corrente constante e método de carga por voltagem constante. Os métodos podem utilizar vários algoritmos que controlam tempos de aplicação de valores de corrente e tensão sobre a bateria.

No método de carga por corrente constante a tensão é variada de modo que o controlador de carga forneça uma corrente relativamente uniforme, independentemente do estado de carga da bateria. Este método é apropriado às baterias traccionárias. No método por voltagem constante uma mesma tensão é aplicada à bateria durante todo o processo de carregamento independentemente do estado de carga da bateria [2].

Como as baterias utilizadas nos sistemas fotovoltaicos operam de forma cíclica, descarregando à noite e recarregando durante o dia, o processo de recarga mais adequado para esses casos é método por voltagem constante e limitação de corrente [15].

Para se obter um rápido, seguro e completo processo de carga da bateria Pb-ac. alguns fabricantes recomendam dividir o processo em quatro estágios, que são denominados: (a) Carga leve ou suave (trickle charge), (b) Carga profunda (bulk charge), (c) Sobrecarga (over charge) e (d) Carga de flutuação (float charge) [13]. A figura 2.13 mostra as curvas de corrente e tensão sobre a bateria durante o processo de carga dividido em quatro estágios.

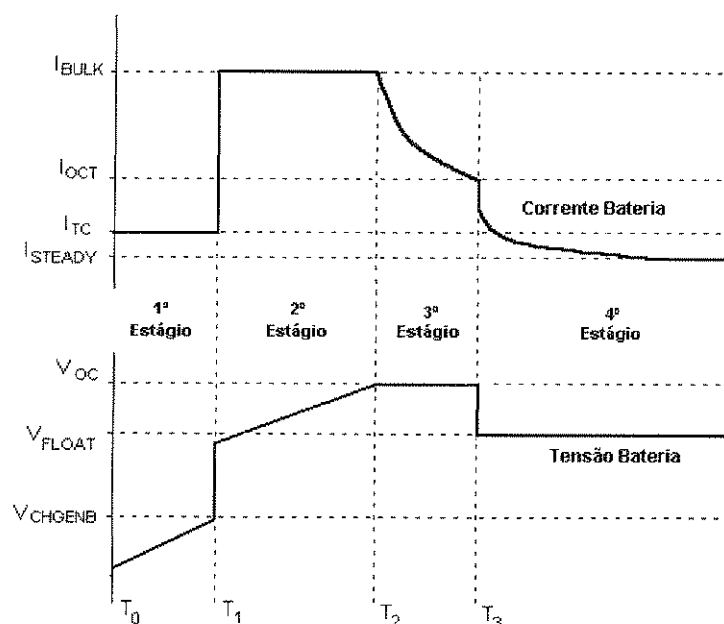


Figura 2.13 – Curvas de corrente e tensão nos quatro estágios do processo de carga da bateria [13]

1º Estágio (de T_0 a T_1) – Carga leve (trickle charge)

Este primeiro estágio ocorre quando a tensão da bateria está abaixo do valor V_{CHGENB} , este valor de tensão indica que a bateria alcançou ou ultrapassou sua capacidade de descarga crítica. Nesta condição, é aplicada à bateria uma pequena corrente I_{TC} até que a sua tensão alcance o valor V_{CHGENB} . Esse estágio também previne que ocorra algum acidente caso as placas de um elemento da bateria estejam em curto-circuito, pois se isto tiver ocorrido a tensão nos terminais da bateria não vai aumentar e assim o processo de carga não passará para o próximo estágio [13].

2º Estágio (de T_1 a T_2) – Carga profunda (Bulk charge)

Após a tensão na bateria alcançar o valor V_{CHGENB} será fornecida à bateria uma corrente constante I_{BULK} . A corrente I_{BULK} é a máxima corrente de carga que a bateria suporta sem excessiva perda de água. Esta corrente é aplicada até que o valor da tensão na bateria alcance o valor máximo de sobrecarga de tensão definido por V_{OC} , em geral, essa corrente deve ser limitada em 40% da capacidade da bateria [13] [15].

3º Estágio (de T_2 a T_3) – Sobrecarga (Overcharge)

Neste estágio, o controlador regulará a tensão da bateria no valor V_{OC} para que ela alcance plena carga. O fim do processo de carregamento pode ser detectado quando a corrente de carga cair a um valor predeterminado I_{OCT} e a tensão permanecer em V_{OC} , assim o próximo estágio se iniciará. O valor de I_{OCT} é em torno de 10% de I_{BULK} [13].

4º Estágio (de T_3 adiante) – Carga de flutuação (float charge)

Neste estágio, o controlador aplicará sobre a bateria uma tensão constante V_{FLOAT} , o que gera uma corrente de carga muito pequena, responsável apenas por recompensar a autodescarga. Ou seja, esta tensão é aplicada à bateria com objectivo de evitar a autodescarga.

À medida que a bateria vai descarregando a sua tensão vai caindo, quando ela alcança $0,9 V_{FLOAT}$ o controlador volta a executar o 2º estágio fornecendo a corrente I_{BULK} . Porém, o controlador só poderá retomar ao 2º estágio caso o painel esteja produzindo energia, se não a bateria continuará descarregando podendo atingir um valor de tensão inferior a V_{CHGENB} , então o controlador deverá retomar ao 1º estágio quando houver energia disponível no sistema [13].

Os valores para V_{CHGENB} , V_{OC} e V_{FLOAT} são fornecidos pelo fabricante e geralmente correspondem à 10.5V, 14.4V e 13.5V respectivamente, para bateria Pb-ac. de 12V de tensão nominal [15].

2.9 Dimensionamento do sistema de armazenamento de energia

O sistema de armazenamento de energia nos sistemas fotovoltaicos é composto por baterias, e estas devem ser dimensionadas para armazenarem a energia consumida diariamente e mais alguns dias de reserva. Desta forma o sistema pode fornecer energia em dias em que a radiação solar é escassa, como por exemplo em dias nublados, compensar as perdas do sistema e assegurar que a carga da bateria não exceda o nível de profundidade de descarga máxima permitido.

Para fazer o dimensionamento das baterias deve se ter em conta os parâmetros que serão a seguir descritos [5]:

- Tensão nominal das cargas e seu tipo
- Potência exigida pela carga
- Horas de utilização da carga / Perfil da carga
- Localização geográfica do sistema

Mostra-se a seguir, um exemplo de uma tabela de consumo de todas as cargas de corrente contínua (cc) e corrente alternada (ca) que se pretendem alimentar, e os procedimentos para o cálculo da capacidade da bateria a escolher para o sistema.

Tabela 2. Tabela de consumo para levantamento do sistema [5]

Aparelho em corrente contínua (CC)	A	B	C	A*B*C
	Qtde.	Uso (h/dia)	Potência do aparelho (W)	Total Wh/dia
Lâmpada fluorescente 7W	1	1	8.5	8.5
Lâmpada fluorescente 9W	2	3	10	60
Lâmpada fluorescente 9W	1	1	10	10
Eq. rádio transmissão	1	1	12	12
Eq. rádio recepção	1	3	10	30
Eq. rádio stand-by	1	20	1	20
Total 1			51.5	140.5

Aparelho em corrente alternada (CA)	A	B	C	A*B*C
	Qtde.	Uso (h/dia)	Potência do aparelho (W)	Total Wh/dia
TV à cores 14''	1	2	60	120
Perdas no inversor	1	2	10	20
Total 2			70	140

Energia total [Wh/dia]	280.5
Potência total [W]	121.5

Procedimentos

- 1) Identificar cada carga de corrente contínua, seu consumo em watts e quantidade de horas por dia que deve operar. No exemplo consideraram-se lâmpadas de baixo consumo de 7 e 9 W que, com seus reactores, consomem respectivamente 8.5 e 10 W. Considerou-se também um equipamento de rádio onde se identificou seu consumo em transmissão e recepção e também em stand-by.
- 2) Multiplicar a coluna A pela B para obter os Wh/dia de consumo de cada aparelho (coluna [A*B*C]).
- 3) Somar os Wh/dia de cada aparelho para obter os Wh/dia totais das cargas em corrente contínua (Total 1)
- 4) Proceder de igual forma para com as cargas em corrente alternada com acréscimo de 10 % de energia adicional para ter em conta o rendimento do inversor (Total 2)

Para poder escolher o inversor adequado deve-se ter claro quais são os níveis de tensão do sistema tanto em termos de CC como CA. Por exemplo, se numa habitação rural for instalado um gerador solar em 12 Vcc, e se deseja alimentar um televisor a cores que funciona a 110 Vca e que consome 60 W, o inversor será de 12 Vcc a 110 Vca e gerenciará no mínimo 60 W. Se existirem outras cargas de CA, deve-se somar todas as que se desejam alimentar de forma simultânea. O resultado da referida soma, mais uma margem de segurança de aproximadamente 10 % determinará a potência do inversor segundo a equação 1:

$$\text{Potência}_{\text{inversor}} = \text{Potência das cargas CA} + 20\% \text{ perdas} \quad (1)$$

- 5) Obter o valor da energia total, que é o resultado da soma entre o total 1 e o total 2.
- 6) Toma-se o valor obtido no item anterior e divide-se pela tensão nominal do sistema. Sendo a tensão de 12 Vcc, então o consumo total de energia da instalação (D_{total}) será:

$$D_{\text{tot}} = \frac{280.5}{12} = 23.375 \text{ Ah/dia}$$

Portanto a capacidade do banco de baterias será calculada pela equação 2:

$$\text{Cap}_{\text{bat}} = 1.66 * D_{\text{tot}} * \text{Aut} \quad (2)$$

Onde:

1.66 – Factor de correcção da bateria que leva em conta a profundidade de descarga admitida, o envelhecimento e um factor de temperatura.

Aut. – Dias de autonomia.

No exemplo adoptado teremos:

$$\text{Cap}_{\text{bat}} = 1.66 * 23.375 * 5 = 194 \text{ Ah}$$

Escolhe-se o modelo de bateria com valor normalizado imediatamente superior ao que resulta deste cálculo. Caso a capacidade encontrada seja superior ao maior modelo comercial disponível, então o banco de baterias deverá ser montado com elementos e múltiplos ligados em paralelo.

3 CONCLUSÃO

Sistemas de geração de energia que dependem de factores naturais, como os sistemas fotovoltaicos, necessitam em muitas das suas aplicações de dispositivos para o armazenamento de energia para que possam aproveitar de forma mais eficiente a energia gerada, e no caso de sistemas fotovoltaicos ter uma maior autonomia. É necessário que sejam instaladas baterias nos referidos sistemas, pois elas são capazes de armazenar directamente a energia eléctrica gerada sobre a forma de energia química e, posteriormente transformá-la, também directamente, em energia eléctrica quando necessitada pelas cargas.

Outra importante função da bateria é fornecer uma corrente superior àquela que o dispositivo fotovoltaico pode fornecer.

Devido ao seu baixo custo em comparação com as outras tecnologias e a sua grande disponibilidade no mercado, as baterias Pb-ác. são as mais usadas em SFI.

Na escolha da bateria Pb-ác. deve ter-se em conta, para além de outros parâmetros, a sua profundidade de descarga, razão pela qual elas necessitam de uma estratégia de controle rigorosa, por parte dos controladores de carga, dos seus processos de carga e descarga para evitar a diminuição da sua vida útil. O processo de carga é normalmente dividido em quatro estágios e proporciona maior segurança e rapidez no restabelecimento da carga.

O controlador de carga da bateria é um equipamento indispensável em sistemas fotovoltaicos em que é necessário o armazenamento de energia. Ele tem a função de gerenciar o processo de carga da bateria garantindo o seu carregamento completo de forma adequada. É também sua função monitorar o processo de descarga, para evitar que ultrapassem a profundidade de descarga recomendada pelos fabricantes de baterias.

Todos os cuidados a tomar com a bateria tem como foco principal o aumento da sua vida útil uma vez que, em SFI, elas correspondem ao componente de mais alto custo, por necessitarem de manutenções periódicas e por terem uma vida útil normalmente quatro a seis vezes menor que os painéis solares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Andersen, R. L. (2006). *Sistema de interligação entre módulos geradores de energia a partir de células a combustível do tipo PEM e um banco de baterias*. Tese de mestrado em engenharia eléctrica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 159 pp.
- [2] Battery Power. *Funding helps push batteries from the lab to the marketplace*, **14**: 14-20
- [3] CEEETA (Centro de Estudos em Economia da Energia dos Transportes e Ambiente). *Tecnologias de micro-geração e sistemas periféricos tecnologias de armazenamento de energia*
- [4] Chagas, M. W. P. (2007). *Novas tecnologias para avaliação de baterias*. Tese de mestrado no curso profissionalizante em desenvolvimento de tecnologia do IEP/LACTEC. Curitiba. 84 pp.
- [5] Energia solar fotovoltaica - Guia prático. Acedido em 20 de Janeiro de 2012, em: [http:// www.solarterra.com.br](http://www.solarterra.com.br)
- [6] Fraga, J. R. C. P. (2009). *Análise do comportamento da bateria utilizada em sistemas fotovoltaicos de pequeno porte*. Tese de mestrado em Agronomia. Faculdade de ciências agronómicas - Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”. Botucatu, SP. 134 pp.
- [7] Freitas, S. S. A. (2008). *Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos*. Tese de mestrado em engenharia electrotécnica. Instituto Politécnico de Bragança – Escola Superior de Tecnologia e Gestão. 94 pp.

- [8] Garrido, E. L. (2010). *Concepção e certificação de nova geração de candeeiros de iluminação pública*. Tese de mestrado em engenharia electrotécnica e de computadores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 83 pp.
- [9] Imhoff, J. (2007). *Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autónomos*. Tese de mestrado em engenharia eléctrica. Centro de tecnologia – Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil. 134 pp.
- [10] Leite, E., Sordi, R.J., *Tudo sobre baterias recarregáveis*. Acedido em 20 de Janeiro de 2012, em: <http://focusfoto.com.br/tudo-sobre-baterias/>
- [11] Martins, N. L. P. (2007). *Sistema integrado de produção e armazenamento de energia a partir de fontes renováveis*. Tese de mestrado em engenharia electrotécnica e de computadores. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa. 103 pp.
- [12] Oliveira, L. G. M. (2005). *Estratégias de controle de carga e descarga em sistemas fotovoltaicos domiciliários*. Tese de mestrado em energia. USP - Universidade de São Paulo. 105 pp.
- [13] Rosemback, R. H. (2004). *Conversor CC-CC bidimensional buck-boost actuando como controlador de carga de baterias em um sistema fotovoltaico*. Tese de mestrado em engenharia eléctrica. Faculdade de engenharia – Universidade Federal De Juiz De Fora (UFJF), MG - Brasil. 120 pp.
- [14] Sá Júnior, E. M. (2004). *Sistemas fotovoltaicos para iluminação pública em horário de ponta*. Tese de mestrado em engenharia eléctrica. Universidade Federal do Ceara, Fortaleza. 90 pp.
- [15] Seguel, J. I. L. (2009). *Projecto de um sistema fotovoltaico autónomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital*. Tese de mestrado em engenharia eléctrica. Escola de engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 203 pp.

[16] Serrão, M. A. S. (2010). *Dimensionamento de um sistema fotovoltaico para uma casa de veraneio em pouso de Cajaiba-Paraty*. Tese de mestrado em engenharia eléctrica. Escola politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ – Brasil. 76 pp.